

Probleme magnetischer Wechselfelder in Hochstromkreisen

Bretthauer, Karlheinz

Veröffentlicht in:
Abhandlungen der Braunschweigischen
Wissenschaftlichen Gesellschaft Band 46, 1995,
S.89-112



Verlag Erich Goltze KG, Göttingen

Probleme magnetischer Wechselfelder in Hochstromkreisen

Von **Karlheinz Bretthauer****, Clausthal-Zellerfeld

(Eingegangen am 11.4.1995)

Inhalt

1. Niederohmige Industrieanlagen hoher Leistung
2. Elektromagnetische Felder
3. Selbst- und Gegeninduktivitäten
4. Drehstrom-Anlagen
 - 4.1. Analyse
 - 4.2. Meßverfahren und Meßfehler
 - 4.3. Unsymmetrie, Triangulierung
5. Nichtlineare Lichtbogen-Kennlinie
 - 5.1. Das Meßsystem
 - 5.2. Adaption der variablen Parameter
6. Modellmäßige Optimierung der Hochstromleitergeometrie
7. Modifiziert coplanare Leitungskonfiguration
8. Wirbelstrom-Effekte
9. Kraftwirkungen im elektromagnetischen Feld

1. Niederohmige Industrieanlagen hoher Leistung

Aus technologischen Gründen müssen industrielle Elektrowärme-Anlagen hoher Leistungen mit hohen Strömen bei relativ niedrigen Spannungen betrieben werden. Solche Anlagen, einschließlich großer bei hohen Temperaturen betriebener Elektrolyseanlagen, wie zum Beispiel Aluminiumelektrolysen, arbeiten mit Strömen bis zur Größenordnung von 100.000 A und Spannungen bis zur Größenordnung von 1.000 V. Die einfache Quotientenbildung ohne Rücksicht darauf, ob es sich um Gleich-, Wechsel- oder Drehstrom handelt, führt zu einer Größenordnung von 10 m Ω . Die Scheinleistung, d.h. also ohne zunächst Phasenverschiebungen bei Wechselstrom zu berücksichtigen, ergibt sich mit den angegebenen Werten zu 100 MVA bzw. zu 100 MW. Diese Anlagen gehören damit zu den größten Verbrauchern elektrischer Leistung, sind aber im Vergleich mit dem, was man normalerweise von elektrischen Anlagen kennt, ausgesprochen niederohmig, woraus sich mancherlei spezifische Probleme ergeben, die in den starken Magnetfeldern solcher Hochstrombahnen ihre Ursache haben.

* Nach einem Vortrag vor der Plenarversammlung der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft am 9.7.1994

** Univ.-Prof. em. Dr.-Ing. K. Bretthauer · Berliner Straße 45 · 38678 Clausthal-Zellerfeld

Zum Vergleich: Eine Herdplatte von 1500 W hat etwa 30Ω , das ist das 3000fache von $10 \text{ m}\Omega$. Deshalb treten manche nachfolgend beschriebene Effekte hier nicht auffällig in Erscheinung.

2. Elektromagnetische Felder

Aus den die elektromagnetischen Felder umfassend beschreibenden Maxwellschen Gleichungen ergibt sich unter anderem das Biot-Savartsche Gesetz, (Bild 1), wonach jede bewegte Ladung und damit jeder stromführende Leiter um sich herum ein mit der Entfernung vom Leiter abnehmendes magnetisches Wirbelfeld aufbaut.

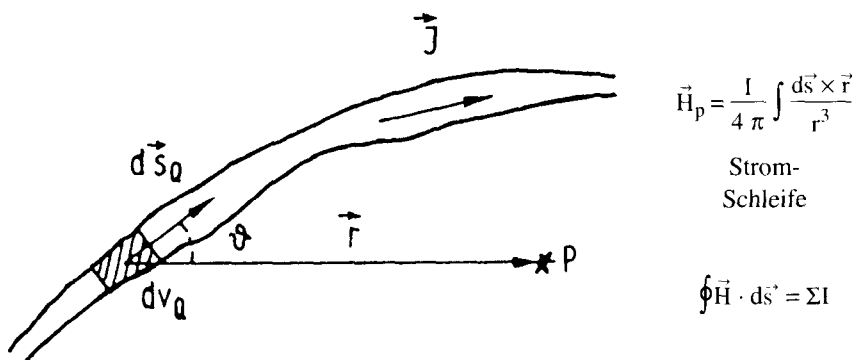


Bild 1

Wechselströme erzeugen in ihrer Umgebung magnetische Wechselfelder, bei Lichtbogen- und Reduktionsöfen mit der Netzfrequenz 50 bzw. 60 Hz. Bei Induktionsöfen kommen häufig höhere Frequenzen zum Einsatz, da die Frequenzen um so höher gewählt werden müssen, je kleiner der Tiegel des Schmelzofens ist oder je geringer die Tiefe der oberflächennahen Durchwärmung des in beiden Fällen elektrisch leitenden Gutes sein soll.

Jedes Stück Strombahn ist Teil eines geschlossenen Stromkreises, der von dem eigenen Magnetfeld durchsetzt wird. Ist dieses Magnetfeld veränderlich, wie z.B. bei Wechselstrom, kommt ein weiterer Effekt der Maxwellschen Gleichungen zum Tragen, das Induktionsgesetz, wonach veränderliche Magnetfelder um sich herum elektrische Wirbelfelder erzeugen, deren Umlaufintegral eine Induktionsspannung ergibt (Gleichung 1). Dieser Effekt wird in Reinstform in Transformatoren angewandt.

$$u_{\text{ind}} = \oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = \frac{d\Phi}{dt}, \quad u_{\text{ind}} = w \frac{d\Phi}{dt} \quad (\text{Gleichung 1})$$

(w = 1) \qquad \qquad \qquad (w = w)

3. Selbst- und Gegeninduktivitäten

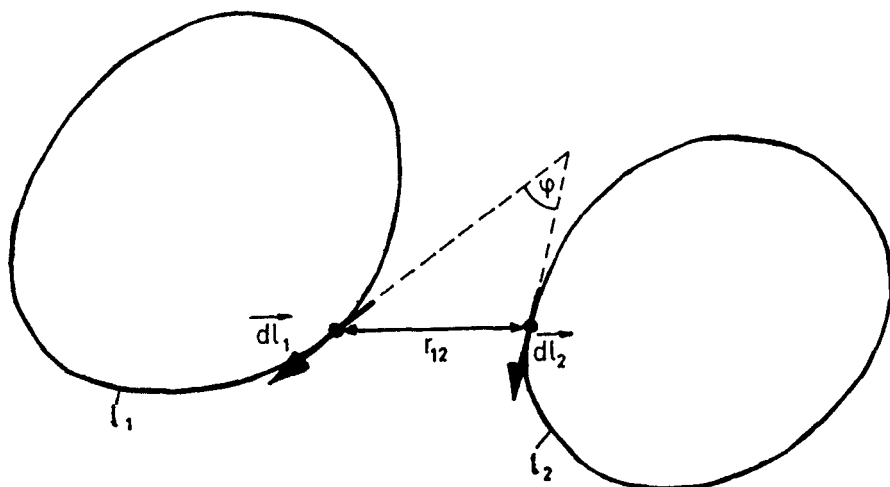
Der Wechselstrom in der Primärwicklung erzeugt das magnetische Wechselfeld im Transformator Kern. Das magnetische Wechselfeld erzeugt dann in beiden Wicklungen Induktionsspannungen. Man bezeichnet den Effekt in der Primärwicklung (Index 1) als Selbstinduktion, den in der Sekundärwicklung (Index 2) als Gegeninduktion (Gleichung 2).

$$u_{\text{ind1}} = L_1 \cdot \frac{di_1}{dt}; \quad u_{\text{ind2}} = M \cdot \frac{di_1}{dt} \quad \text{für } (i_2 = 0) \quad (\text{Gleichung 2})$$

Die durch den Selbstinduktionseffekt hervorgerufene Spannung ist stets so gerichtet, daß sie der Ursache, also den Stromänderungen beim Wechselstrom entgegen wirkt, also praktisch wie ein zusätzlicher Widerstand. Bei periodischem Wechselstrom bezeichnet man diesen Widerstand als induktiven Blindwiderstand X , (Gleichung 3); seine Größe ist frequenzproportional und ist von einer durch die Geometrie des Stromkreises bestimmten Größe L , die man als Selbstinduktivität bezeichnet, abhängig.

$$X = 2\pi f \cdot L = \omega L \quad L \sim w^2 \quad (\text{Gleichung 3})$$

Bei Spulen, also mehrschleifigen Systemen, wie sie normalerweise in Transformatoren angewandt werden, wachsen die Induktivitäten mit dem Quadrat der Windungszahl an. Wie das Neumannsche Doppel-Integral auch für die sogenannte Gegeninduktivität M zwischen zwei Schleifen zeigt (Bild 2), ist auch diese von ausschließlich geometrischen Größen abhängig, abgesehen vom Materialwert μ_r in $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$, als relative Permeabilität bezeichnet.



$$M_{12} = \frac{\mu}{4\pi} \oint_{l_1} \oint_{l_2} \frac{d\vec{l}_1 \cdot d\vec{l}_2}{r_{12}} = \frac{\mu}{4\pi} \oint_{l_1} \oint_{l_2} \frac{dl_1 \cdot dl_2 \cdot \cos \varphi}{r_{12}}$$

Bild 2

Bei den industriellen Erwärmungsanlagen, die zuvor genannt wurden, sind die Strombahnen, in denen die Nutzwärme entwickelt wird, stets Bahnen mit einer einzigen Windung, woraus sich die niedrigen induktiven Blindwiderstände und daraus letztlich die eingangs erwähnten niederohmigen Scheinwiderstände ergeben. Dagegen wachsen die Induktivitäten mit den linearen Abmessungen des Systems, was dazu führt, daß die induktiven Blindwiderstände mit wachsender Ofengröße zunehmen, was bei immer leistungstärkeren und damit zwangsläufig größeren Anordnungen höhere Speisespannungen erfordert, die heutzutage bei Lichtbogen- und Reduktionsöfen ein Überschreiten der Normgrenze für Niederspannung 1.000 V bedingen, wodurch man in den Bereich der wesentlich stärkere Sicherheitsmaßnahmen erfordernden Hochspannungstechnik gerät, wenn es nicht gelingt, im Rahmen der Europäischen Normung Sonderregelungen für solche Hochleistungsöfen, die als Drehstromöfen gebaut werden, durchzusetzen.

4. Drehstrom-Anlagen

4.1 Analyse

Drehstrom ist bekanntlich ein System aus drei Wechselströmen, die normalerweise gegeneinander zeitlich um ein Drittel Periodendauer versetzt sind, so daß im symmetrischen Drehstromsystem die Summe der drei Ströme in jedem Moment Null ist. Dies gilt nach dem 1. Kirchhoffschen Gesetz (Knotenpunktgesetz) auch für unsymmetrische Systeme, wenn keine Sternpunktverbindung zwischen Verbraucher und Spannungsquelle vorhanden ist, was für Ofenanlagen stets zutrifft. Die drei Stränge eines solchen Systems bilden in sich drei Schleifen (Bild 3).

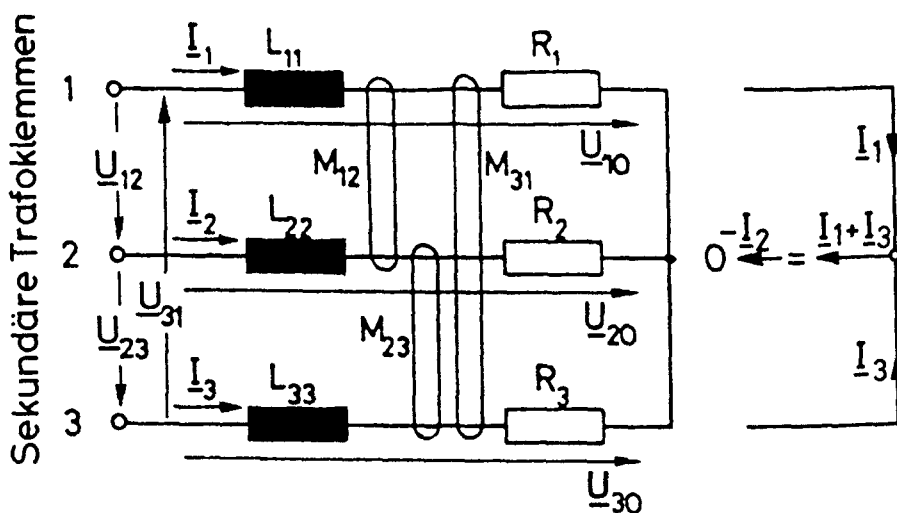


Bild 3

Bei der Berechnung der Induktivitäten eines solchen Systems ist man leicht geneigt, den einzelnen Strängen eine Selbstinduktivität und ihnen untereinander Gegeninduktivitäten zuzuordnen, die man formal nach dem vorhin dargestellten Neumannschen Doppelintegral für jeden Strang bzw. für jeweils zwei Stränge gegenseitig berechnen kann. Bei der Optimierung der Geometrie der Hochstromleitungen von Lichtbogenöfen und Reduktionsöfen wurde das vielfach auch so gemacht und hat oftmals zu überraschenden Enttäuschungen geführt. Der Grund liegt darin, daß Induktivitäten und Gegeninduktivitäten nur für geschlossene Kreise physikalisch definiert sind, was für den mathematischen Formalismus oftmals vergessen wird oder manchmal auch gar nicht bewußt ist.

Man muß also bei der Aufstellung physikalisch einwandfreier, ein solches System beschreibender Gleichungen anders vorgehen. Man bedient sich dazu zweckmäßig des für Netzwerksberechnungen bekannten Prinzips der Kreisströme, das sich aus dem vorhin genannten Knotenpunktsatz ableiten läßt. Man betrachtet die Ströme z.B. der beiden Außenstränge als über den mittleren Strang zurückgeführt; die Überlagerung der beiden rückgeführten Ströme im mittleren Strang ergibt zwangsläufig dann den dort tatsächlich fließenden Strom.

Da das System aus drei internen Schleifen besteht, lassen sich auch drei verschiedene Paarungen von Kreisströmen ansetzen, die man bei der Aufstellung der Gleichungen für die verketteten oder Leiterspannungen zwischen den sekundären Transformatorklemmen vorteilhaft auswählen kann (Gleichung 4).

$$\begin{aligned} \underline{U}_{12} &= \underline{I}_1 (R_1 + j\omega M_{13,12}) - \underline{I}_2 (R_2 + j\omega M_{23,21}) \\ \underline{U}_{23} &= \underline{I}_2 (R_2 + j\omega M_{21,23}) - \underline{I}_3 (R_3 + j\omega M_{31,32}) \\ \underline{U}_{31} &= \underline{I}_3 (R_3 + j\omega M_{32,31}) - \underline{I}_1 (R_1 + j\omega M_{12,13}) \end{aligned} \quad (\text{Gleichung 4})$$

In jeder Gleichung gibt es dann zwei Gegeninduktivitäten M der beiden Stromschleifen in die jeweilige Spannungsschleife, also insgesamt 6 Gegeninduktivitäten. Da aber der Wert einer Gegeninduktivität in beiden Richtungen der gleiche ist, d.h. unabhängig davon, welche Schleife den induzierenden Strom führt und welche diejenige ist, in der die Spannung der Gegeninduktion erzeugt wird, verbleiben nur drei Gegeninduktivitäten.

Das Ersatzschaltbild (Bild 4) erfüllt die drei Spannungsgleichungen mit den in Gleichung 5 angegebenen Substitutionen.

Es enthält scheinbar keine magnetischen Kopplungen mehr, so daß sich die Sternspannungen gegen den Ofensternpunkt sofort angeben lassen (Gleichung 5):

$$\begin{aligned} \underline{U}_{10} &= \underline{I}_1 (R_1 + j\omega L_1) \text{ mit } L_1 = M_{13,12} = M_{12,13} \\ \underline{U}_{20} &= \underline{I}_2 (R_2 + j\omega L_2) \text{ mit } L_2 = M_{21,23} = M_{23,21} \\ \underline{U}_{30} &= \underline{I}_3 (R_3 + j\omega L_3) \text{ mit } L_3 = M_{32,31} = M_{31,32} \end{aligned} \quad (\text{Gleichung 5})$$

Die Ersatzschaltbildgrößen einer vorgegebenen Ofenanlage meßtechnisch zu bestimmen, bereitet keine Schwierigkeiten. Durch Herstellen einphasiger Versuchsbedingungen lassen sie sich mit Hilfe von Spannungs-, Strom- und Phasenwinkelmessungen direkt oder indirekt ermitteln. Am bequemsten ist dies bei Lichtbogenöfen durch Anheben jeweils einer Elektrode bis zum Stromabriß möglich. Dabei ist aus später noch zu erläuternden Gründen zu beachten, daß nur Spannungsmessungen zwischen räumlich relativ

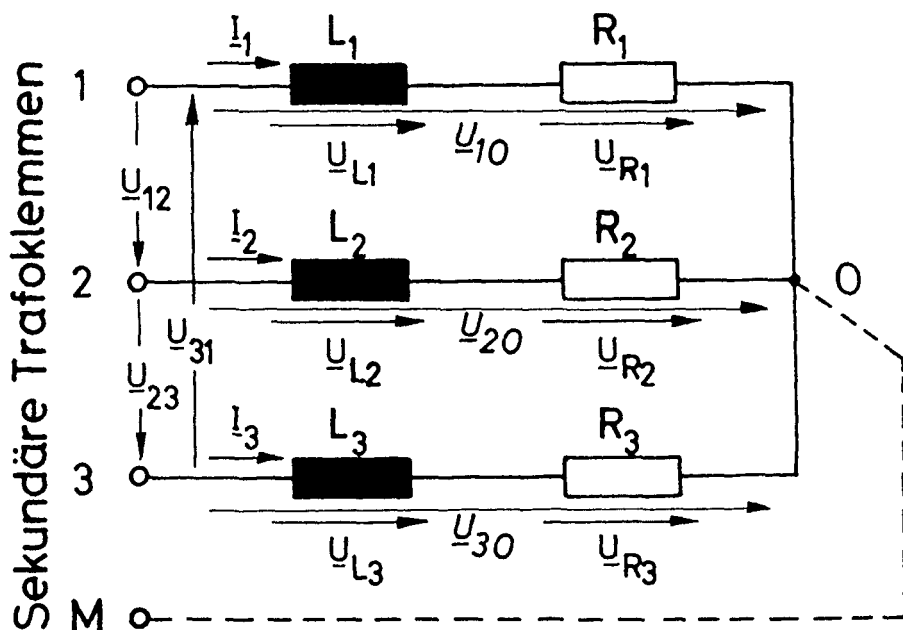


Bild 4

dicht nebeneinander liegenden Punkten des Systems angewandt werden dürfen. Dies gilt weitgehend für die drei Spannungen an den Transformatorklemmen. Aus dem Gleichungssystem für die Einphasenversuche kann man durch Trennung von Realteil und Imaginärteil dann die Ersatzschaltbildinduktivitäten L_1 bis L_3 und die ohmschen Widerstände R_1 bis R_3 berechnen.

4.2 Meßverfahren und Meßfehler

Stromstärken von mehreren 10.000 A Wechselstrom zu messen, die in dicken Leiterbündeln fließen, ist grundsätzlich nach dem Prinzip des Durchsteck- oder Fensterstromwandlers möglich. Es gibt dafür jedoch keine handelsüblichen Ausführungen, so daß Sonderanfertigungen erforderlich sind. Dieser teuren Lösung weicht man normalerweise dadurch aus, daß man handelsübliche Stromwandler auf der Primärseite oder im sogenannten Zwischenkreis des den Ofen speisenden Transformators einsetzt und damit die Tatsache ausnutzt, daß der Transformator nicht nur die Spannung entsprechend dem gewählten Windungszahlverhältnis transformiert, sondern auch mit dem umgekehrten Verhältnis die Ströme, wobei man bei großen Transformatoren den durch den Magnetisierungsstrom entstehenden Fehler vernachlässigen kann. Wir haben aber für die Messung der Ofenströme auf ein altbekanntes, jedoch selten angewandtes Prinzip des magnetischen Spannungsmessers, auch Rogowski-Gürtel genannt, zurückgegriffen. Es handelt sich dabei um eine auf einem langen elastischen nichtleitenden Schlauch oder Ähnlichem aufgewickelte Spule, Windung an Windung bis zu den beiden Enden bewickelt. Umschlingt man mit diesem Gebilde den stromdurchflossenen Leiter so, daß die

beiden flachen Enden genau aneinander stoßen, dann wird in dieser Wicklung wie in der Sekundärwicklung eines Transformators eine Spannung der Gegeninduktion erzeugt, für die die Gleichung $u = M \cdot di/dt$ gilt. Wenn man dieses elastische Gebilde in einer Entfernung von den stromführenden Leitern verlegt, die ein Mehrfaches des eigenen Durchmessers ausmacht, dann spielt es keine Rolle, auf welchem Weg der magnetische Spannungsmesser verlegt wird, weil das Umlaufintegral der magnetischen Feldstärke $\oint \vec{H} d\vec{s} = I$ um den stromdurchflossenen Leiter auf jedem beliebigen Weg das Gleiche ist. Durch Integration des Meßsignales erhält man dann den Verlauf des Stromes. Der Einsatz der magnetischen Spannungsmesser erweist sich jedoch im Rahmen einer anderen Meßaufgabe, nämlich die Lichtbogen Spannung richtig zu messen, als besonders vorteilhaft, weil dabei, wie sich zeigen wird, insbesondere der Differentialquotient des Stromes eine benötigte Meßgröße ist.

Für die Regelung eines Lichtbogenofens stehen zwei Stellgrößen zur Verfügung, zum einen die veränderbare Sekundärspannung des Ofentransformators und zum anderen der Höhenstand der Elektroden Spitze, über welchen die Lichtbogenlänge einzuregeln ist. Da eine unmittelbare Längenmessung in diesem mehrere tausend Kelvin heißen Bereich nicht möglich ist und auch optische Methoden aufgrund der praktischen Gegebenheiten nicht in Frage kommen, ist die Lichtbogen Spannung eine wesentliche Hilfsgröße für die Regelung der Lichtbogenlänge, da diese Spannung mit Vergrößerung der Lichtbogenlänge anwächst.

Betrachtet man wieder das Ersatzschaltbild (Bild 4), so scheint die Lichtbogen Spannung relativ leicht meßbar zu sein. Man messe die drei Spannungen von z.B. den drei Anschlüssen des Ofentransformators zum Ofenkessel über eine gemeinsame Meßleitung nach dort. Da die Ofenzustellung für hochohmige Meßanschlüsse hinreichend gut leitend ist, greift man über diese Leitung das Potential des schmelzflüssigen Bades ab. Wenn man dann in einer Rechenschaltung von diesen gemessenen Spannungswerten den jeweiligen ohmschen und den induktiven Spannungsabfall gemäß Ersatzschaltbild abzieht, sollte man als Ergebnis die Größen der Lichtbogen Spannungen erwarten. Aber schon bei den geläufigen Impedanzregelungen stellte man immer wieder ein nur begrenzt befriedigendes Regelverhalten fest. Einen Hinweis für den Grund erhält man, wenn man während des Betriebes einmal eine nicht fest verlegte Meßleitung in ihrer Lage verändert. Man stellt nämlich fest, daß sich die Spannungsmeßwerte allein schon durch die räumliche Verlagerung der Meßleitung verändern.

Für fünf verschiedene Meßleitungsführungen sind hier im Zeigerdiagramm (Bild 5) die Potentiale M bis M5 am Anschluß der Meßleitung eingetragen. Gegenüber dem richtigen Potential 0 schwanken die größten Betragsfehler zwischen 15 und 25%, die größten Winkelfehler zwischen $5,9^\circ$ und $13,2^\circ$.

Das gleiche Phänomen beobachtet man, wenn man ein Hochstromseil seitlich auslenkt. Da sonst keinerlei Veränderung einhergehen soll, kann dieser Effekt nur auf die veränderte Geometrie, das heißt, auf Veränderungen der im System wirkenden Gegeninduktivitäten zurückzuführen sein. Die Meßleitung bildet ja über die Hochstrombahnen wieder geschlossene Kreise, in welche von den Hochstromschleifen ebenfalls Spannungen eininduziert werden. Für eine gleichungsmäßige Beschreibung des Systems mit Einschluß der Spannungsmessung muß man also weitere Gegeninduktivitäten zwi-

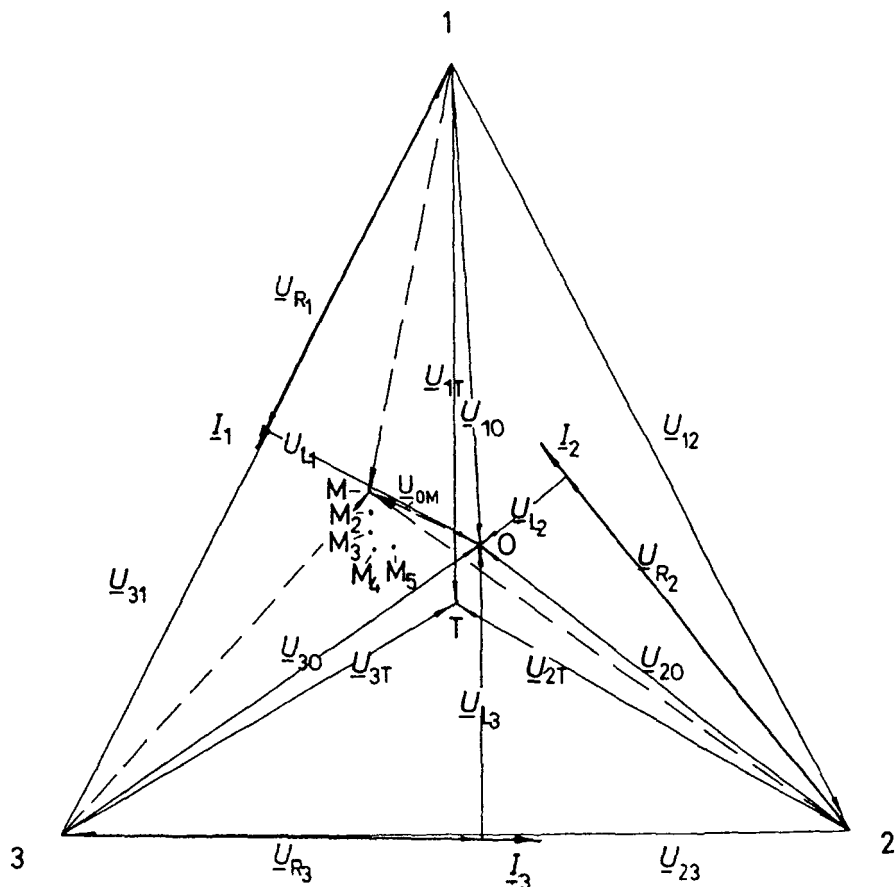


Bild 5

schen den Hochstromschleifen und den drei von der Meßleitung mit den Hochstrombahnen gebildeten Schleifen berücksichtigen.

Für jede der drei Meßschleifen gibt es zwei von den Hochstromschleifen herrührende wirksame Gegeninduktivitäten, also insgesamt 6. Die Gleichungen für die drei gegen die Meßleitung gemessenen Spannungen sehen dann wie folgt aus (Gleichung 6).

$$\begin{aligned}\underline{U}_{1M} &= \underline{U}_{10} + I_1 j\omega M_{12,3M} - I_3 \cdot j\omega M_{23,1M} = \underline{U}_{10} + \underline{U}_{0M1} \\ \underline{U}_{2M} &= \underline{U}_{20} + I_2 j\omega M_{23,1M} - I_1 \cdot j\omega M_{31,2M} = \underline{U}_{20} + \underline{U}_{0M2} \\ \underline{U}_{3M} &= \underline{U}_{30} + I_3 j\omega M_{31,2M} - I_2 \cdot j\omega M_{12,3M} = \underline{U}_{30} + \underline{U}_{0M3}\end{aligned}\quad (\text{Gleichung 6})$$

Hier erscheint in allen drei Gleichungen eine zusätzliche Spannung $\underline{U}_{0M1,2,3}$, die wir als Fehlerspannung bezeichnen. Mit dem Knotenpunkts-Gesetz und den Regeln für die Umformung von Gegeninduktivitäten findet man eine gemeinsame, symmetrische Darstellung für \underline{U}_{0M} , die zeigt, daß die drei Fehlerspannungen, wie zu erwarten, identisch

sind. Zusätzlich ist hier bereits eine Darstellung als Differentialgleichung angegeben (Gleichung 7).

$$\begin{aligned}\underline{U}_{0M} &= I_1 \cdot j\omega M_{2M,M3} + I_2 \cdot j\omega M_{3M,M1} + I_3 \cdot j\omega M_{1M,M2} \\ &= \underline{U}_{0M1} = \underline{U}_{0M2} = \underline{U}_{0M3} \\ u_{0M} &= M_{2M,M3} \cdot \frac{di_1}{dt} + M_{3M,M1} \cdot \frac{di_2}{dt} + M_{1M,M2} \cdot \frac{di_3}{dt}\end{aligned}\quad (\text{Gleichung 7})$$

Alle hier neu auftretenden Gegeninduktivitäten lassen sich in ähnlicher Weise, wie zuvor für die Hochstromkreise angegeben, ohne Schwierigkeit einmessen, so daß auch die Spannung \underline{U}_{0M} bzw. u_{0M} , die man in einem erweiterten Ersatzschaltbild (Bild 6) jetzt in den Meßleitungsstrang einfügen muß, meßtechnisch erfaßbar ist.

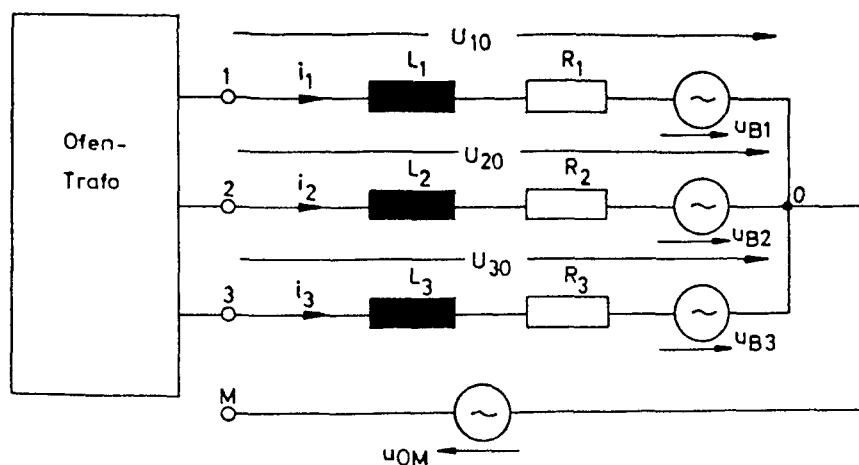


Bild 6

Zu welch dramatisch falschen Ergebnissen Messungen führen können, wenn man dies nicht berücksichtigt, haben wir einmal an einem besonders drastischen Fall eines Karbidofens mit einer etwas ungewöhnlichen Führung der Hochstromleitungen erfahren. Dort war der Leistungsumsatz in jedem Strang für die Betriebsführung des Ofens von Interesse, da sich bei dieser Ofenbauart unter jeder Elektroden ein eigener Sumpf flüssigen Karbids bildete, und deshalb unter jeder Elektrode separat abgestochen wurde. In einem bestimmten Betriebszustand ergaben die Leistungsumsätze unter den drei Elektroden mit der herkömmlichen Messung die folgenden Werte (Tabelle 1).

Tabelle 1: gemessene Strangwirkleistungen

$$P_{1M} = 10,45 \text{ MW}, P_{2M} = 16 \text{ MW}, P_{3M} = 8,65 \text{ MW}$$

$$P_{1M} : P_{2M} : P_{3M} = 1,21 : 1,85 : 1$$

Die abgestochenen Mengen des flüssigen Karbids korrelierten aber überhaupt nicht mit den Meßwerten der über die Leistung ermittelten Energieumsätze. Nachdem wir aber in die gemeinsame Spannungsmeßleitung zum Ofenkessel eine die Fehlerspannung kom-

pensierende Zusatzspannung eingeführt hatten, ergaben sich folgende Leistungsmeßwerte (Tabelle 2).

Tabelle 2: tatsächliche Strangwirkleistungen

$$P_{10} = 10,3 \text{ MW}, P_{20} = 12,9 \text{ MW}, P_{30} = 11,8 \text{ MW}$$

$$P_{10} : P_{20} : P_{30} = 1 : 1,25 : 1,15$$

Die daraus berechneten Energieumsätze korrelierten dann ausgezeichnet mit den Abstichmengen. Die Summe der drei Leistungen von 35 MW wird allerdings immer richtig ermittelt.

Der Betrieb konnte anhand der jetzt auch genau meßbaren ohmschen Widerstände sogar Qualitätsunterschiede des für den Prozeß erforderlichen Kalks feststellen.

4.3 Unsymmetrie, Triangulierung

Ich muß noch einmal zurückkommen auf die Ersatzschaltbildinduktivitäten L_1 , L_2 und L_3 in den Hochstromsträngen. Ich erwähnte vorhin die Stellgröße Höhenstandsänderung der Graphitelektroden. Letztere sind in Halterungen an vertikal verstellbaren Tragarmen eingespannt. Diese Verstellbarkeit ist insbesondere wegen des Elektrodenabbrandes erforderlich, so daß von Zeit zu Zeit die Elektroden um ein Stück nachgesetzt werden und gelegentlich eine neue Länge am oberen kalten Ende angesetzt wird. Während des Betriebes einer Ofenanlage ergeben sich dadurch zwangsläufig wechselnde und unterschiedliche Höhenstände der Tragarme mit ihren Hochstromleitungen, und das bewirkt natürlich Veränderungen aller Gegeninduktivitäten.

Das hat zweierlei zur Folge. Zum einen ändert sich die Stromverteilung in den drei Strängen. Eine möglicherweise bei einer eingemessenen Ausgangsstellung der drei Tragarme noch vorhandenen Symmetrie der drei Ströme, das heißt alle drei sind gleich groß, verändert sich während des Betriebes. Die im Normalfall gewünschte gleichmäßige Höchstbelastung der drei Stränge ist also nicht mehr gegeben. Zum anderen werden auch die ermittelten Lichtbogenspannungen verfälscht, da sich die in die Spannung u_{0M} eingehenden Gegeninduktivitäten geändert haben.

Zwar läßt sich eine Stromsymmetrie durch angepaßte Höhenstandsveränderung der drei Tragarme erreichen. Es ist aber nicht nur Stromsymmetrie wünschenswert, sondern auch Leistungssymmetrie, das heißt dann praktisch auch Lichtbogenspannungssymmetrie. Will man beides erreichen, muß also noch eine zweite Stellgröße zur Verfügung stehen, und das geht dann nur noch über unsymmetrisch einstellbare Transformatorspannungen. Hierfür sind sogenannte Manteltransformatoren mit größerer Bauleistung erforderlich, die aber nur in seltenen Fällen eingesetzt werden. Für die laufende Einregelung der unterschiedlichen Strangspannungen des Transformators haben wir eine spezielle, umfangreiche Rechengänge erfordernde Strategie mit darauf aufbauender Regelung entwickelt.

Der symmetrische Ofenbetrieb läßt sich so zwar erreichen, die Belastung des speisenden Hochspannungsnetzes ist aber trotzdem unsymmetrisch und damit ebenso unerwünscht. Man ist deshalb in der Praxis bemüht, die Geometrie der Hochstrombahnen so

zu gestalten, daß sie in der sogenannten Grundstellung der Tragarme gleichgroße Ersatzschaltbildinduktivitäten L1 bis L3 ergeben und versucht im Betrieb durch angepaßtes Nachsetzen der Elektroden diese Symmetrie weitgehend aufrecht zu erhalten.

Es hat sich im Verlaufe der Jahre die sogenannte triangulierte Konfiguration (Bild 7) der Hochstromleitungen durchgesetzt, im Gegensatz zu der koplanaren Anordnung (Bild 8) bei den kleineren Öfen früherer Jahrzehnte.

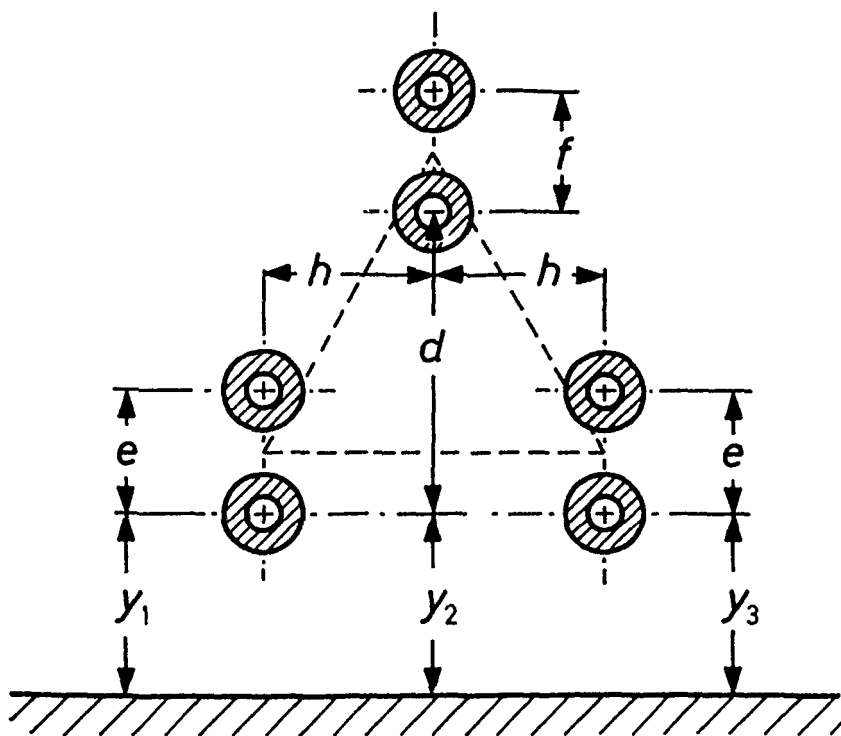


Bild 7

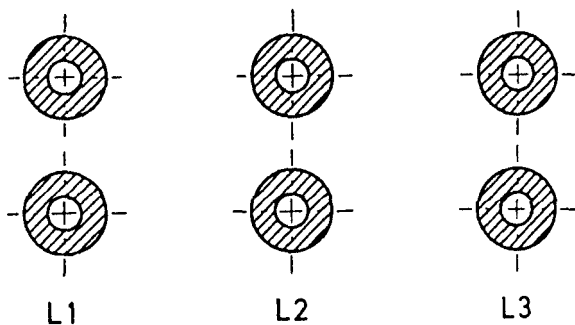


Bild 8

Bei der koplanaren Leitungsführung sind die Ersatzschaltbildinduktivitäten der beiden äußeren Stränge gleich groß, die des mittleren Stranges etwa 30% bis 40% niedriger. Im Extremfall eines Reduktionsofens mit Reihenanordnung statt im Grundriß rotationssymmetrischer Anordnung der Elektroden betrug die Ersatzschaltbildinduktivität des mittleren Stranges sogar nur 37% des Wertes der äußeren Stränge. Bei symmetrischer Einspeisung führt dann, je nach Drehsinn des Spannungszyklus, einer der äußeren Stränge den kleinsten Strom. Ob der mittlere oder der andere äußere Strang den größten Strom führt, hängt von der Verteilung der ohmschen Widerstände zu den Blindwiderständen ab.

5. Nichtlineare Lichtbogen-Kennlinie

Die bisherigen Darstellungen gingen von der Annahme aus, daß die Verbraucherwiderstände, in denen die elektrische Leistung in Wärme umgesetzt wird, lineare ohmsche Widerstände sind, was für Öfen mit in den Möller eintauchenden Elektroden, wie bei manchen Reduktionsöfen, auch weitgehend der Fall ist. Bei Öfen mit frei- oder zumindest teilweise freibrennenden Lichtbögen wirken sich die nichtlinearen Lichtbogenkennlinien aus, wie dieses Kennlinienfeld (Bild 9) mit der Lichtbogenlänge als Parameter zeigt.

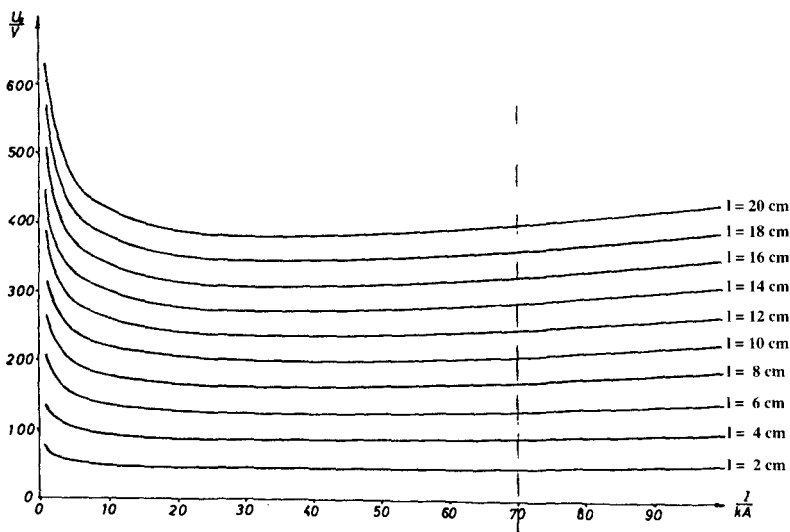


Bild 9

Rechnung mit Berücksichtigung der Strahlungsverluste

Die thermischen Abläufe im Lichtbogen spielen sich mit Zeitkonstanten ab, die sich auch innerhalb einer Halbwelle der normalen Netzfrequenz deutlich auswirken. Die ohmschen Widerstände im bisherigen Ersatzschaltbild müssen daher, soweit sie auf den Lichtbogen entfallen, durch Wechselfeldspannungsquellen der Netzfrequenz, aber mit nicht sinusförmigem Spannungsverlauf ersetzt werden, der dem Lichtbogenspannungsabfall während jeder Halbwelle entspricht. Auch die Fehlerspannung u_{0M} kann nicht mehr als sinusförmig vorausgesetzt werden.

Somit können auch die für das System gültigen Gleichungen nicht mehr auf die bequeme komplexe Rechnung zurückgreifen. Die die Lichtbogenspannungen $u_{B1,2,3}$ beschreibenden Differentialgleichungen können, wie hier zu erkennen, so aufgestellt werden, daß die Fehlerspannung u_{0M} gar nicht in Erscheinung tritt (Gleichung 8).

$$\begin{aligned} u_{B1} &= u_{1M} - i_1 R_1 + M_{12,1M} \frac{di_2}{dt} + M_{13,1M} \frac{di_3}{dt}, \\ u_{B2} &= u_{2M} - i_2 R_2 + M_{23,2M} \frac{di_3}{dt} + M_{21,2M} \frac{di_1}{dt}, \\ u_{B3} &= u_{3M} - i_3 R_3 + M_{31,3M} \frac{di_1}{dt} + M_{32,3M} \frac{di_2}{dt}. \end{aligned} \quad (\text{Gleichung 8})$$

Dafür tauchen hier erstmalig Gegeninduktivitäten zur Meßleitung auf, die einen Hochstromstrang gemeinsam haben. In diesen Gleichungen ist wieder vorausgesetzt und realisierbar, daß die Anschlüsse 1, 2, 3 und M relativ nah beieinander liegen. Jetzt wird der Vorteil des Einsatzes magnetischer Spannungsmesser deutlich, die ja die benötigten Differentialquotienten der Ströme unmittelbar liefern. Deren Integration wird nur für die relativ kleinen ohmschen Spannungsabfälle auf den Zuleitungen benötigt und für eine eventuelle erwünschte oszillographische Darstellung der Stromverläufe.

5.1 Das Meßsystem

Hier sieht man das Schaltbild unserer ersten Ausführung des Meßsystems, mit dem nun korrekte Meßwerte der Lichtbogenspannungen für Meß- oder Regelzwecke verfügbar wurden, korrekt mit Einschränkungen, auf die ich gleich zu sprechen komme (Bild 10). An den neun in der Schaltung erkennbaren Potentiometern müssen die den sechs Gegeninduktivitäten und die den drei ohmschen Widerständen entsprechenden Werte einjustiert werden. Dies ist ohne Kenntnis der genannten Größen mit Hilfe von je drei Einphasenversuchen möglich, zum einen bei brennenden Lichtbögen und zum anderen bei Elektrodenkurzschlüssen mit dem Bad. Bei der Einjustierung der Gegeninduktivitäten wird die physikalische Notwendigkeit ausgenutzt, daß in jedem Moment die Lichtbogenspannung, entsprechend der Feldstärke im Lichtbogen, und der Lichtbogenstrom die gleiche Richtung haben müssen. Das heißt, trotz nichtlinearen Zusammenhangs zwischen Spannung und Strom müssen die Nulldurchgänge immer im gleichen Moment erfolgen. Bei der Einjustierung der ohmschen Widerstände wird auf Lichtbogenspannung Null justiert.

Hier sieht man die Meßergebnisse für einen bewußt stark unsymmetrisch eingestellten Betriebszustand (Bild 11). Während die drei Stromverläufe oben relativ gut sinusförmig

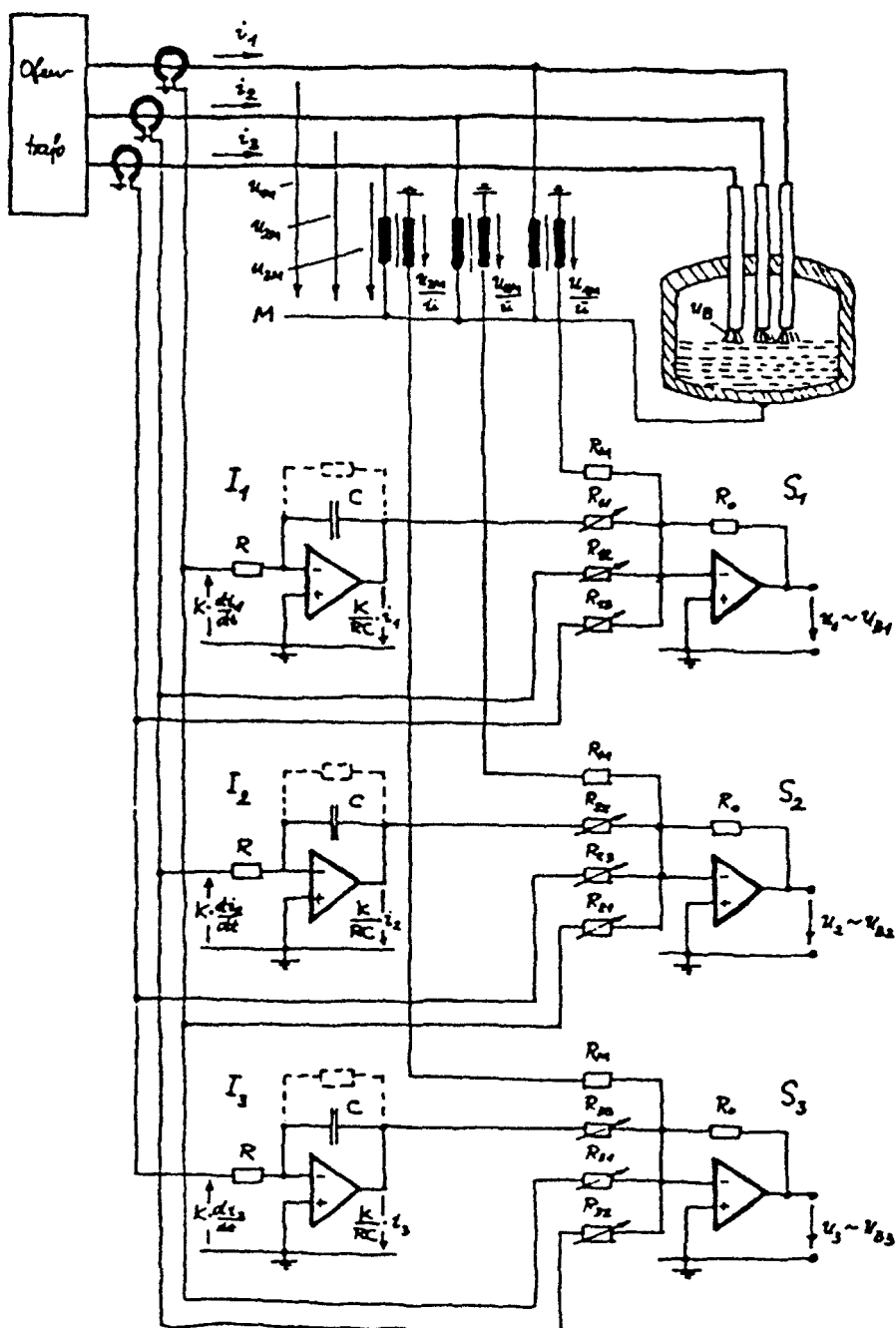


Bild 10

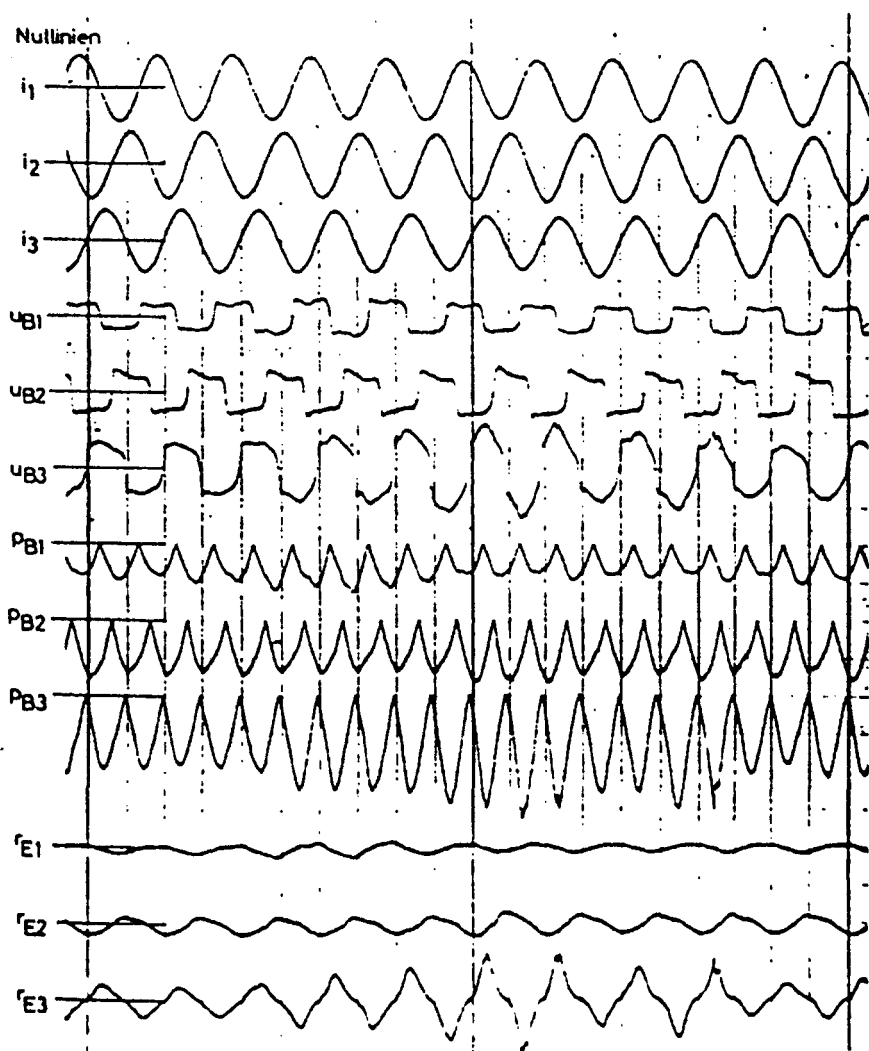


Bild 11

mig erscheinen, ähneln die Halbwellen der Lichtbogenspannungen zum Teil eher einem Trapez, insbesondere je kleiner die Spannung ist. Die dritte Gruppe von oben zeigt die drei Leistungen, die gemäß den eben genannten Kriterium beim gleichzeitigen Nulldurchgang von Spannung und Strom ebenfalls Null sind, aber wegen stets gleichen Vorzeichens von Spannung und Strom nur positive Werte annehmen, in diesem Fall von der Nulllinie nach unten aufgezeichnet.

Auffällig sind auch die Amplitudenschwankungen mit einer Periodenlänge von in diesem Falle etwa 8 Netzspannungsperioden. Diese als Flicker bezeichneten Amplitu-

denschwankungen, die je nach Ofen in einem Bereich von 3 bis 10 Hz liegen können, sind, wie die Nichtlinearität des Lichtbogens, wegen ihrer unerfreulichen Rückwirkungen auf das speisende Netz wesentliche Nachteile des Lichtbogenofenbetriebes, die bei schwachen Netzen, man sagt dann bei Netzen mit zu geringer Kurzschlußleistung, unter Umständen kostspielige Zusatzeinrichtungen erfordern, um die Netzrückwirkungen so zu begrenzen, daß andere von diesem Netz gespeiste Verbraucher nicht unzutraglich gestört werden.

5.2 Adaption der variablen Parameter

Ich komme jetzt auf die vorhin angedeutete Einschränkung bezüglich der Genauigkeit des vorgestellten Meßsystems für die Lichtbogenspannungen zurück. Wie bereits gesagt, müssen während des Betriebes die Höhenstände der Elektroden tragarme und damit der Hochstromleitungen verstellt werden, besonders stark in der Einschmelzphase von Schrott. Mit diesen Änderungen der Geometrie gehen dann natürlich Änderungen der Gegeninduktivitäten einher. Wird die Grundstellung bei der Eineichung des Meßsystems verlassen, gibt es also zwangsläufig Meßfehler. Daraus ergab sich der Wunsch nach einer Weiterentwicklung des Meßsystems derart, daß die die Gegeninduktivitäten repräsentierenden Justagewerte sich während des Betriebes automatisch an Veränderungen adaptierten. Entsprechend den eben erläuterten Nulldurchgangskriterien werden dafür Zeitunterschiede im Nulldurchgang der Meßwerte von Lichtbogenspannung und Lichtbogenstrom als Signal für eine erforderliche Korrektur verwendet, jetzt aber mit der Anforderung, daß dies während des dreiphasigen Betriebes geschehen muß und nicht unter einphasigen Testbedingungen.

Das erklärt, daß dieser parameterkorrigierende Prozeßbeobachter, kurz als Adaption zur Grundmeßeinrichtung bezeichnet, einen relativ hohen technischen Aufwand erfordert. Es sind ja bis zu sechs Gegeninduktivitäten zu korrigieren, wobei wegen der dreiphasigen Kopplung des Gesamtsystems bei Änderung des Höhenstandes auch nur eines Tragarmes bereits zwei Hochstromschleifen verändert werden, was sich bereits auf vier zu adaptierende Gegeninduktivitäten auswirkt. Außerdem ergeben sich während einer Parameterkorrektur wegen des dreiphasigen Betriebes gegenseitige Beeinflussungen, die sich erst ausregeln müssen. Trotzdem wurde erreicht, daß die Adaptionsvorgänge so schnell ablaufen, daß bei den in der Praxis zu erwartenden Veränderungen die kurzzeitigen Abweichungen der Nulldurchgänge auf dem Oszilloskop fast nicht wahrgenommen werden können. An einem Beispiel sieht man den Unterschied der Meßergebnisse für Lichtbogenspannung und -strom mit (oben) und ohne (unten) Adaption (Bild 12).

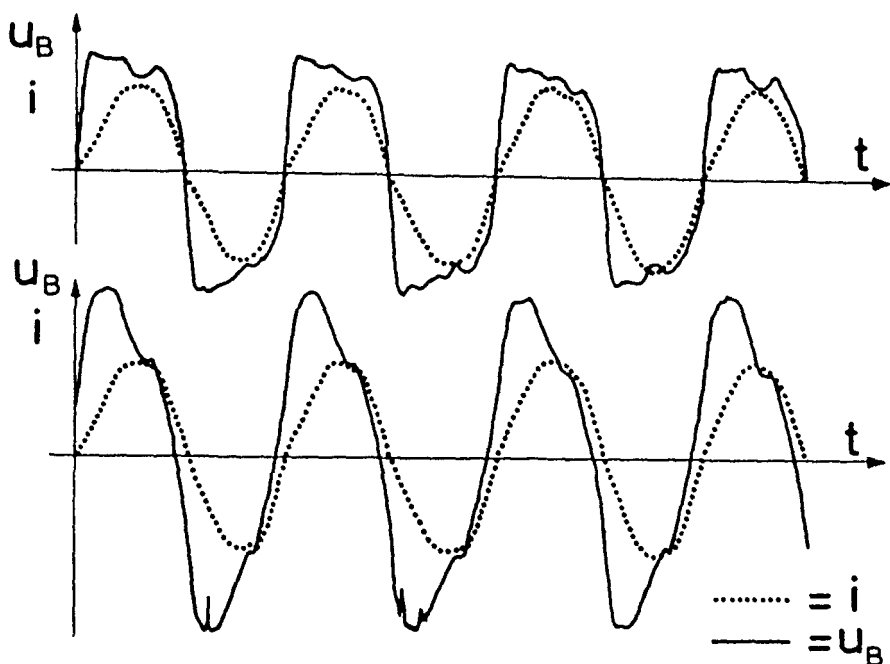


Bild 12

6. Modellmäßige Optimierung der Hochstromleitergeometrie

Die Vorausberechnung der Ersatzschaltbildinduktivitäten der Hochstrombahnen eines Lichtbogenofens anhand vorliegender Konstruktionspläne ist natürlich prinzipiell möglich. Aber unsere ersten Versuche mit sinnvoll erscheinenden Aufteilungen der Hochstromleiter in einzelne Abschnitte, mit einer weitgehenden Annäherung an die tatsächlichen Geometrie, erbrachten eine Anforderung an Rechnerkapazität, die unser damaliger Hochschulrechner nicht erfüllen konnte. Später mögliche Rechnungen mit sogar verfeinerter Anpassung an die Konstruktionsgeometrie ergaben immer noch Abweichungen von mehr als 5% gegenüber der Realität. Mit Aufkommen der triangulierten Führung der Hochstrombahnen wurden aber die Ansprüche an die Hersteller bezüglich der elektrischen Symmetrie immer schärfer, und die Lieferzeiten und damit die für Berechnung und Konstruktion zur Verfügung stehenden Zeitspannen waren üblicherweise knapp bemessen.

Eine kurzfristige Ermittlung der Ersatzschaltbilddaten für einen vorgelegten Konstruktionsentwurf haben wir dann mit Modellmessungen ermöglicht (etwa im Maßstab 1:5). Gegenüber dem Original ist dann weniger als 1% des Materialeinsatzes erforderlich. Die Modellversuche werden ohne Lichtbogen gefahren, als wenn die Elektroden in das Stahlbad eintauchen würden, das heißt also im Elektrodenkurzschluß. Man kommt mit wenigen kW Speiseleistung aus.

Auf Holzgestellen wurde der Verlauf der Hochstrombahnen weitestgehend maßstabsgetreu nachgebildet. Dabei mußte beachtet werden, daß die Induktivitäten den linearen Abmessungen proportional sind, die ohmschen Widerstände sich aber umgekehrt mit den linearen Abmessungen ändern. Für verwertbare Messungen war es aber erforderlich, daß die Phasenwinkel zwischen Spannung und Strom mit dem Original übereinstimmten. In den Phasenwinkel geht aber noch die Frequenz ein, und zwar mit $\tan \varphi = \omega \cdot L/R$. Durch den Verkleinerungsmaßstab 1:5 geht der Quotient L/R auf $1/25$ zurück, was dann im Modell durch fünfundzwanzigfache Betriebsfrequenz, normalerweise also $50 \cdot 25 = 1250$ Hz ausgeglichen werden mußte.

Mit Hilfe eines für diesen Zweck beschafften Umformers mit gut sinusförmigem Spannungsverlauf konnten innerhalb etwa eines Monats die zu erwartenden Ersatzschaltbilddaten und damit auch die zu erwartende Symmetrie angegeben werden, ferner Vorschläge für Konstruktionsänderungen, die wir durch schnell mögliche Veränderungen am Modell natürlich vorab überprüften. Dieses Verfahren hat sich bei zahlreichen Neubauten als außerordentlich treffsicher erwiesen. Wenn sich dann bei den ausgeführten Anlagen überraschende Abweichungen ergaben, stellte sich stets heraus, daß im Nachhinein noch Konstruktionsänderungen vorgenommen wurden, die dem Hersteller unkritisch erschienen.

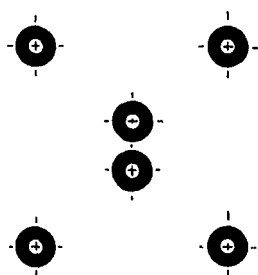
7. Modifiziert coplanare Leitungskonfiguration

Für moderne große Öfen mit Leistungen von mehreren 10 MW muß die Konstruktion folgende drei Ziele berücksichtigen.

1. Die drei Ersatzschaltbildinduktivitäten sollen in Normalstellung der Elektroden gleich groß, also symmetrisch sein, um einen weitgehend symmetrischen Ofenbetrieb zu erzielen.
2. Die drei Induktivitäten sollen möglichst klein sein, um die Ofenanlage mit möglichst günstigem $\cos \varphi$, zugleich mit möglichst geringer erforderlicher Speisespannung betreiben zu können. Je größer und leistungsfähiger eine Ofenanlage sein soll, um so schwieriger wird es, wünschenswerte maximale Induktivitäten nicht zu überschreiten.
3. Bei den unvermeidlichen Höhenstandsänderungen der Tragarme sollen die Induktivitätsänderungen und als deren Folge die betrieblichen Unsymmetrien und somit auch die nicht optimale Ausnutzung der Anlage möglichst klein sein.
4. Die Teilleiter jedes Stranges sollen möglichst gleichmäßig belastet werden.

Selbstverständlich läßt sich nur ein mittleres Optimum dieser Kombination von Forderungen erreichen.

Forderung 1: Die Symmetrie in Normalstellung läßt sich mit der sogenannten triangulierten Querschnittsgeometrie der Hochstrombahnen, wie sie bereits gezeigt wurde, erreichen.



modifiziert coplanar

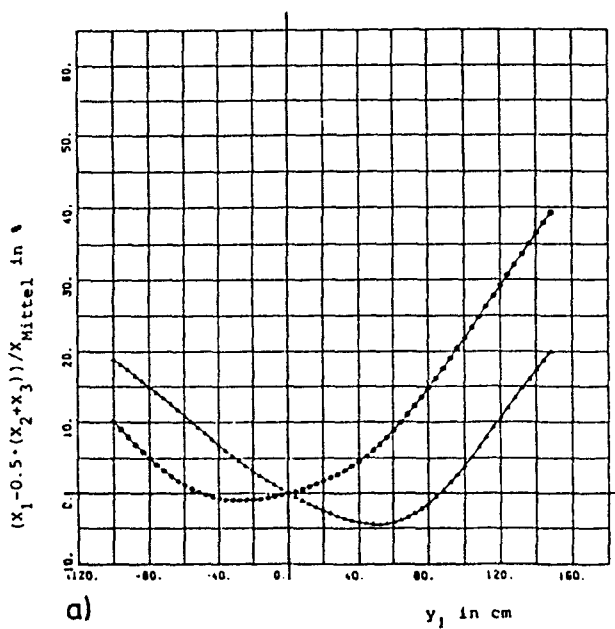
Bild 13

Um Forderung 2, möglichst kleine Induktivitäten, zu erfüllen, muß man zunächst einmal die Ersatzschaltbildinduktivitäten der äußeren Stränge möglichst klein machen. Schaut man sich die Definition dieser Ersatzschaltbildinduktivitäten an, dann erkennt man, daß man den Abstand zwischen den beiden äußeren Strängen, das heißt also das Maß h in Bild 7, möglichst klein halten muß.

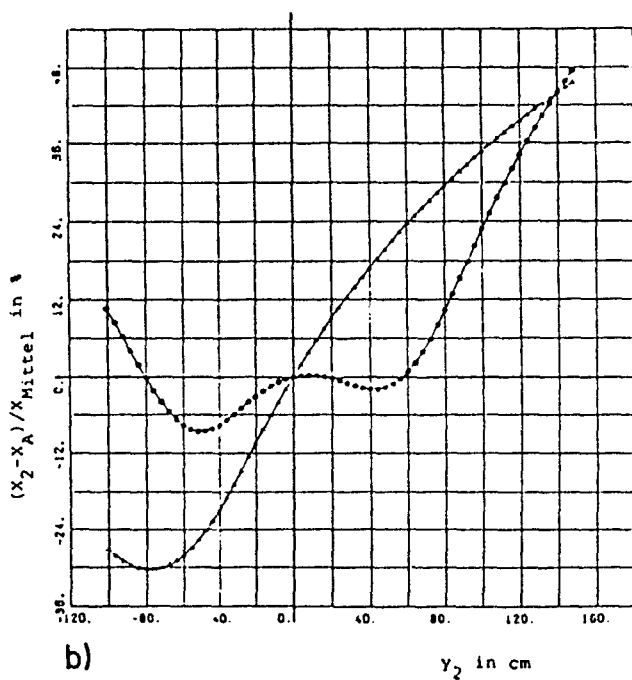
Die Forderungen 3 und 4, also geringe Auswirkungen von Höhenstandsänderungen und möglichst gleichmäßige Stromverteilung auf die Teilleiter eines Stranges, lassen sich durch eine modifiziert coplanare Anordnung weitaus besser erfüllen (Bild 13).

Der wesentliche Trick ist die starke vertikale Spreizung der Teilleiter in den Außensträngen, so daß man das Ganze wie zwei mit der Spitze aufeinandergestellte triangulierte Systeme betrachten kann. Die Symmetrie wird nicht angetastet, aber die Forderungen 2 bis 4 werden deutlich besser erfüllt. Bei einem gewissen Vorstellungsvermögen für Felddiagramme kann man das qualitativ leicht nachvollziehen. Sowohl eine Verlängerung als auch eine Einengung eines magnetischen Flusses ergibt kleinere Induktivitäten. Wegen der starken vertikalen Spreizung wirken sich Höhenstandsänderungen wesentlich geringer auf das Flußbild aus. Wegen der symmetrischen Geometrie zur horizontalen Mittellinie ergeben sich in Grundstellung überhaupt keine ungleichen Stromverteilungen auf die Teilleiter eines Stranges.

Zwei Diagramme (Bild 14) zeigen das Ergebnis im Vergleich, wobei man im Rahmen praktischer Verhältnisse den Abszissenbereich zwischen etwa -40 bis $+40$ cm betrachten muß. Bei a) wurde der Höhenstand eines Außentragarmes, bei b) der des mittleren verändert. Bei a) ist die Schwankungsbreite innerhalb des angegebenen Bereiches bei der modifiziert coplanaren Anordnung etwa halb so groß wie bei der triangulierten, bei b) nur etwa $1/5$.



a) modifiziert coplanar ...



b) trianguliert ...

Bild 14

8. Wirbelstromeffekte

Bezüglich der Anzahl der Teilleiter eines Stranges und deren gegenseitiger Anordnung hat es in der Vergangenheit manche Variante bei ausgeführten Anlagen gegeben. Interessant war dann natürlich die Frage, wie sich der Gesamtstrom des Stranges auf die Teilleiter verteilt. Mißt man das nun mit sogenannten Stromzangen, die man nacheinander um die Teilleiter legt, dann stellt man fest, daß die entscheidende geometrische Summe der Teilströme deutlich geringer ist als der Gesamtstrom. Der Grund liegt darin, daß die Stromzange wie ein zusätzlicher kleiner Widerstand wirkt und damit einen Teil des Stromes von dem gemessenen Teilleiter auf die anderen verschiebt. Führt man die Strommessung aber mit magnetischen Spannungsmessern durch, die bei hochohmigen Abschluß der Spule praktisch überhaupt keinen Widerstand darstellen, dann kommt das richtige Summenergebnis heraus. An einem Modell mit vier Teilleitern je Strang konnten wir auf diese Weise messen, daß die Teilströme sich bis zum Verhältnis 2:1 voneinander unterschieden.

Dieser und eine ganze Reihe anderer Effekte kann unter dem Stichwort Wirbelströme betrachtet werden, die sich entweder dem Leiterstrom überlagern oder in leitenden Materialien der näheren Umgebung der Hochstrombahnen erzeugt werden. Ein paar in diesen Bereich gehörende Stichworte sind: Stromverdrängung, Skineffekt, Proximityeffekt und Eindringtiefe.

Auf die Bedeutungen im Einzelnen kann ich in diesem Rahmen nicht eingehen. Allen sind sich ändernde starke Magnetfelder, normalerweise Wechselfelder, gemeinsam. Ein weites Feld der gezielten Nutzenanwendung dieser Effekte stellen die Induktionsöfen für Schmelzprozesse oder zum Erwärmen festen Gutes oder das weite Feld der induktiven Oberflächenerwärmung zur Oberflächenvergütung dar. In allen Fällen muß es sich um elektrisch leitende Materialien, also Metalle oder Metallegierungen handeln.

Einige Erfahrungen aus dem Bereich der Reduktions- und Lichtbogenöfen sollen verdeutlichen, in welch überraschendem Maße die von den Hochstrombahnen ausgehenden Magnetfelder auf leitende Bauelemente in der Umgebung einwirken können. Bei Ofenkesseln mit genieteter Stahlaußenhaut kommt es vor, daß an verschiedenen Stellen ohne erkennbares System Niete und ihre Umgebung zu glühen anfangen. In diesen Fällen ist ein schlechter leitender Übergang der miteinander verbundenen Metallteile, der sich möglicherweise erst im Verlaufe der Zeit einstellt, die Ursache. Hier hilft nur, ein dickes Blech, die Glühstelle überdeckend, mit den Rändern an die Stahlhaut des Ofengefäßes anzuschweißen, das heißt, den unvermeidlichen Wirbelströmen in der Außenhaut einen besseren Weg anzubieten, und damit verschwindet der Glüheffekt.

Gelegentlich glaubt ein Ofenbetreiber es besonders gut zu machen, wenn er unten an den Ofenkessel eine leitende Verbindung zu irgendwelchen Teilen der Stahlkonstruktion des Gebäudes herstellt, um aus vermeintlichen Sicherheitsgründen eine gute Erdung des Ofenkessels zu erreichen. Oft ist diese Leiterverbindung dann nach kurzer Zeit weggebrannt, weil, gemessen am Leiterquerschnitt, viel zu hohe Ströme geflossen sind. Aus konstruktiven Gründen ist es nämlich gar nicht vermeidbar, daß der Ofenkessel noch an anderen Stellen in innig leitender Verbindung zur Gesamtstahlkonstruktion steht, so daß mit dem erwähnten Leiter zusätzliche leitende Schleifen geschaffen werden, in welche

Sekundärströme eininduziert werden, die nicht nur nichts nützen, sondern zusätzliche Leistungsverluste erzeugen.

An den Gebädestahlträgern eines Reduktionsofens mit Nennströmen von 100.000 A wurden auffällige Erwärmungen festgestellt. Wieder mit Hilfe der magnetischen Spannungsmesser konnten wir die Ströme in den Gebädeträgern, soweit sie umschlingbar waren, messen und ermittelten Höchstwerte von 2000A.

Je näher metallische Bauteile im Bereich der Hochstrombahnen liegen, um so stärker sind natürlich die Wirbelstromeffekte. Deshalb müssen zum Beispiel nicht nur die Hochstromrohre, sondern auch die die Elektroden tragenden Stahlarme von Lichtbogenöfen permanent mit Wasser gekühlt werden. An besonders kritischen Stellen erzielt man durch Abdeckung des Bereiches mit etwa 1 cm dicken Kupferplatten gute Erfolge, weil dann das weitaus besser leitende und sich daher wesentlich weniger erwärmende Kupfer sozusagen die Wirbelströme übernimmt und die dahinter liegenden Stahlteile abschirmt.

Mit einer ähnlichen Maßnahme konnten wir den Ausfall eines Ersatztransformators verhindern, bei dem sich die gleichen Warnsignale des sogenannten Buchholzschutzes zeigten wie beim Originaltransformator, bei dem sich der Betriebsausfall ereignet hatte. Aus Gründen vorgegebener Gebäudeverhältnisse hatte sich für diese Ofenanlage die Besonderheit ergeben, daß die Hochstromableitungen in der Nähe der Transformator-Kesselwand zunächst einmal einige Meter abwärts geführt werden mußten. Die von diesen Ableitungen ausgehenden magnetischen Wechselfelder waren so stark, daß sie nicht nur den Kessel selbst zusätzlich erwärmten, sondern sogar im Inneren des Ölkessels die bandförmigen, isolierten Zuleitungen zu den Durchführungen über Wirbelströme so stark erhitzen, daß diese Isolation mehr und mehr verschwelte. Die Empfehlung, zwischen dem Ofenkessel und den senkrechten Ableitungen eine Aluminiumplatte von 1,5 cm Stärke einzuhängen, konnte in kürzester Frist realisiert werden und das Problem lösen.

Wenn die Konstruktion einer Neuanlage solche kritischen Stellen vermuten läßt, dann wäre es natürlich interessant zu wissen, mit welchen Stromdichten man etwa in welchem Bereich rechnen muß, um daraus die zu erwartenden Verlustleistungen mit dem dafür erforderlichen Kühlungsbedarf zu berechnen. Auch hierfür boten sich wieder Modellmessungen an. Wie aber kann man die Stromdichte an der Oberfläche, zum Beispiel einer Stahlplatte, wo sie am größten ist, messen (Bild 15)?

An zwei Stellen der Oberfläche einer von Wirbelströmen beeinflussten leitenden Oberfläche sind die Meßleitungen eines Spannungsmessers angeschlossen. Im Fall c) wird die Schleife von dem senkrecht zur Zeichenebene verlaufenden magnetischen Fluß durchsetzt, als Wechselfluß induziert er eine Spannung. Legt man jedoch, wie bei a) u. b) angedeutet, eine sehr dünne isolierte Meßleitung unmittelbar auf die Oberfläche des Leiters, so daß praktisch keine freie Fläche zwischen Stromleiter und Meßleitung entsteht, dann kann auch keine Spannung eininduziert werden und der Meßwert gibt ausschließlich den Spannungsabfall der Oberflächenstromdichte zwischen den beiden Anschlußpunkten an. Unter Einbeziehung der Leitfähigkeit des Materials kann daraus die Oberflächenstromdichte berechnet werden (Gleichung 9).

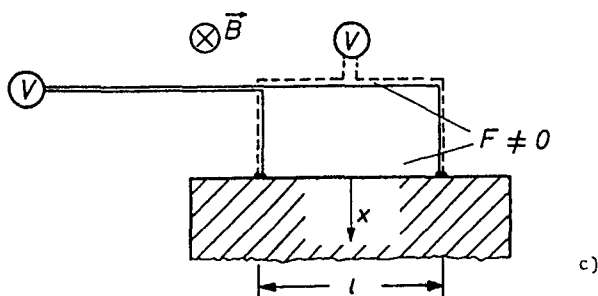
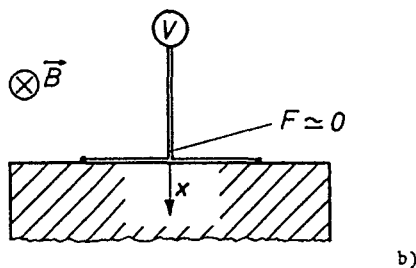
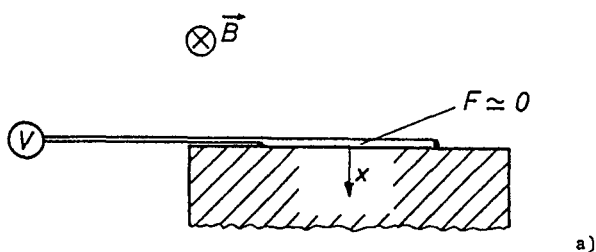


Bild 15

Meßleitungsführung

a) richtig b) richtig c) falsch

$$s_0(t) = \kappa \cdot \frac{u(t)}{l} \quad \hat{s}_0 = \kappa \cdot \frac{\hat{u}}{l} \quad (\text{Gleichung 9})$$

Unter weiterer Einbeziehung der Frequenz und gegebenenfalls ferromagnetischer Eigenschaften des Leiters läßt sich dann mit Gleichung 10 berechnen, wie die Stromdichte in das Innere des Leiters hinein abnimmt

$$s(x, t) = \hat{s}_0 \cdot e^{-kx} \cdot \cos(\omega t - kx)$$

$$\text{mit } k = \sqrt{0,5 \cdot \omega \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \kappa} = \frac{1}{\delta}$$

δ = Eindringtiefe (Gleichung 10)

und daraus wiederum die in ohmsche Verlustwärme umgesetzte elektrische Leistung (Gleichung 11).

$$P' = \frac{P}{\text{Oberfläche}} = \frac{\xi_0^2}{4 \cdot \kappa \cdot k} \quad (\text{Gleichung 11})$$

Mit nach diesem Prinzip aufgebauten Meßapparaturen können dann Oberflächenstromdichten von Wirbelströmen nach Größe und Richtung ermittelt werden und gegebenenfalls konstruktive Veränderungen vorgeschlagen werden.

Ich möchte abschließend darauf hinweisen, daß die hier vorgestellten Phänomene in allen Wechselstromsystemen auftreten. Bei den meisten Anwendungen treten sie nur nicht merkbar wirksam in Erscheinung, weil sie gegenüber den erwünschten Hauptvorgängen zu klein sind. Je größer und je niederohmiger aber eine Anlage ist, um so mehr treten sie hervor, sie können sich störend auswirken, sie können aber auch für bestimmte Anwendungen gezielt genutzt werden.

9. Kraftwirkungen im elektromagnetischen Feld

Effekte mit Kraftwirkungen auf stromdurchflossene Leiter im Magnetfeld können im Rahmen und zum Abschluß dieses Vortrages nur noch erwähnt werden, zumal sie nicht an Wechselströme und Wechselfelder gebunden sind. Sie treten auch bei Gleichströmen und Gleichfeldern auf. Deshalb seien hier noch zur Abrundung ein paar einschlägige Stichworte genannt, die für niederohmige Anlagen großer Leistung mit flüssigem, leitenden Gut kennzeichnend sind:

Der Buckel-Effekt in Aluminium-Schmelzflußelektrolysen; die Badaufwölbung bei Induktions-Tiegelöfen; die Badbewegung bzw. Durchwirbelung; der Pintsch-Effekt in Induktions-Rinnenöfen, ein Einschnürungseffekt des Gutes in der Rinne; die Förderung in Transportrinnen. Die wirksamen Kräfte werden als Lorentz-Kräfte bezeichnet, die sich als Kraftdichte-Vektorprodukt aus Stromdichte-Vektor und Magnetflußdichte-Vektor ebenfalls aus den Maxwell'schen Gleichungen ableiten lassen.